

О. М. Черняк, В. М. Бурдейна, С. М. Артюх

## УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОГЛИНУТОЇ ДОЗИ СПЕЦІАЛЬНИМ ОДЯГОМ, ЩО ОПРОМІНЮЄТЬСЯ ПРИСКОРЕНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

**Предметом** дослідження в статті є математична модель поглинутої дози спеціальним одягом. **Мета** роботи – удосконалити математичну модель поглинутої дози спеціальним одягом, що опромінюється прискореними електронами. В статті вирішуються наступні **завдання**: дослідити можливість застосування удосконаленої математичної моделі поглинутої дози спеціальним одягом в залежності від частоти проходження імпульсів пучка прискорених електронів, швидкості конвеєра і геометричних параметрів об'єкта, для розрахунку технологічних режимів процесу радіаційної стерилізації. Використовуються **методи**: математичної фізики. Отримано наступні **результати**: зазначено про важливість догляду за спеціальним одягом робітників; визначені певні недоліки сучасних методів дезінфекції і обґрунтовано необхідність дезінфекції спеціального одягу прискореними електронами за допомогою спеціальних прискорювачів електронів; встановлено, що основний критерій радіаційної дезінфекції є поглинута доза та обґрунтовано необхідність визначення максимально допустимого значення дози за допомогою математичної моделі. Удосконалена математична модель поглинутої дози спеціальним одягом дає можливість розрахувати режими опромінення різних матеріалів спеціального одягу, які відрізняються розміром, формою і фізичними властивостями, що дозволить розробити систему нормативних режимів технології радіаційно-фізичної дезінфекції робочого одягу та забезпечити законодавчі та нормативні вимоги гігієни праці. Розраховано нормативні режими процесу дезінфекції спеціального одягу у вигляді залежності поглинутої дози в залежності від частоти проходження імпульсів пучка та швидкості конвеєра. **Висновки**: удосконалено математичну модель поглинутої дози спеціальним одягом в залежності від частоти проходження імпульсів пучка прискорених електронів швидкості конвеєра і геометричних параметрів об'єкта, та застосовано для розрахунку нормативних технологічних режимів процесу дезінфекції спеціального одягу.

**Ключові слова**: математична модель; поглинута доза; прискорені електрони; спеціальний одяг; дезінфекція.

### Вступ

Науково-технічний розвиток супроводжується безперервним удосконаленням техніки і технології, використанням нових матеріалів та джерел енергії, що призводить до виникнення нових показників небезпеки, які обумовлюють всезростаюче значення проблеми забезпечення безпеки праці. У системі заходів з безпеки праці засоби індивідуального захисту і, зокрема, спеціальний одяг займають одне з основних місць, оскільки їх застосовують в тих випадках, коли іншими заходами неможливо забезпечити безпеку праці. На сьогоднішній день, однією з проблем експлуатації спеціального одягу робітників є втрата захисних і гігієнічних властивостей до закінчення нормативного терміну носіння, що є наслідком техногенних катастроф, впливу шкідливих виробничих факторів, кліматичних умов, недотриманням режиму носіння і правил догляду за виробами.

Відповідно до статті 163 Кодексу законів про працю України та статті 8 Закону України "Про охорону праці" [1] на роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або, що виконуються в несприятливих метеорологічних умовах, працівникам видаються безоплатно за установленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту. Згідно з пунктом 17 "Мінімальних вимог безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці" очищення, прання, обезпилювання, дегазація, дезактивація, дезінфекція, знешкодження мають здійснюватись роботодавцем в

неробочий час (у вихідні дні) або під час міжзмічних перерв [2].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз законодавчих і нормативних вимог показав, що сучасні гармонізовані українські нормативні документи не регламентують чітких вимог основних показників якості спеціального одягу, які в свою чергу повинні бути гарантом безпеки праці на виробництві [3, 4]. Проведений аналіз гігієнічних властивостей спеціального одягу, показав, що від впливу шкідливих та небезпечних чинників тканини одягу змінює свої властивості внаслідок зносу і забруднення. Одяг крім механічного та хімічного забруднення, піддається забрудненню мікроорганізмами і паразитами. Тканини одягу, забруднені пилом, виділеннями з носоглотки, випарами, можуть містити патогенні збудники - мікобактерію туберкульозу, мікроорганізми тифо-паратифозної групи, стрептококи, стафілококи. Через забруднений одяг можуть передаватися черевний тиф, дизентерія та інші інфекції. Небезпека такої передачі визначається тривалістю виживання мікроорганізмів на тканині. З огляду на епідемічну небезпеку та забезпечення гігієни праці спеціальний одяг необхідно дезінфікувати [5, 6].

Проведено аналіз існуючих методів дезінфекції спеціального одягу, який показав, що загальновідомі методи дезінфекції можуть викликати зношеність і усадку тканин, крім того, для деяких широко використовуваних видів спеціального одягу деякі методи дезінфекції взагалі неприйнятні, так як погіршується якість спеціального одягу. Тому в

останні десятиліття все більшого поширення набуває дезінфекція іонізуючим випромінюванням [7, 8].

Аналіз робіт, які присвячені використанню радіаційних технологій, показав, що в порівнянні з традиційними термічними або хімічними технологіями, у радіаційних технологіях значні переваги, такі як збільшення продуктивності обробки, зменшення енергоспоживання, економія сировини і матеріалу, зменшення забруднення навколишнього середовища, відповідність екологічним нормам, прецизійний контроль процесу і продукції, що обробляється, отримання продукції вищої якості, низькі експлуатаційні витрати, високі економічні показники. У той же час питання, пов'язані з радіаційною дезінфекцією спеціального одягу, а особливо одягу який має утеплювачі недостатньо вивчені і розроблені [9-11].

Пропонується застосовувати метод дезінфекції одягу, заснований на застосуванні іонізуючого випромінювання. Сутність способу полягає в тому, що спеціальний одяг піддається обробці прискореними електронами [12]. Для радіаційного модифікування матеріалів, радіаційної полімеризації, стерилізації медичних виробів, обробки харчових продуктів, в радіаційно-фізичних технологіях, а також в екології для очищення стічних вод, викидних газів і обробки твердих відходів широко застосовуються електронні прискорювачі [13, 14].

Одним з основних критеріїв радіаційної обробки є поглинута доза. Доза в будь-якій точці ящика залежить від енергії електронів, середнього струму, ширини розгортки, швидкості конвеєра, товщини і щільності об'єкта, а також самого матеріалу, який знаходиться між вікном виведення пучка, і цією точкою. На дозу також може впливати наявність неоднорідностей в оброблюваному матеріалі внаслідок розсіювання електронів на межах розділу [15]. Встановлення максимально допустимого значення поглинутої дози є обов'язковою, тому що при перевищенні допустимого значення можна зруйнувати матеріал спеціального одягу. Якщо, матеріалу дати завищену дозу, то він буде розповзатися, якщо ще більшу, то буде розсіпатися. Якщо дати малу дозу, то матеріал не буде повністю дезінфікований. Поглинута доза визначається експериментальним шляхом, але така процедура витратна за часом та ресурсами і не завжди є можливість її проведення. У таких випадках для розрахунку поглинутої дози може застосовуватися математична модель.

Метою роботи є удосконалити математичну модель поглинутої дози спеціальним одягом, що опромінюється прискореними електронами.

### Вирішення завдання

Для ефективного застосування обчислювальних методів використовують знання фізики процесу проходження прискорених електронів через речовину. Тому, для розрахунку поглинутої дози  $D_e$  речовиною

при проходженні прискорених електронів використовується наступна формула:

$$D_e = 1,6^{13} \Phi \frac{S_{col}}{\rho}, \quad (1)$$

де  $\Phi$  – флюенс електронів (число частинок, які перетинають поверхню одиничної площі –  $\Phi = N/S$ ),  $\text{см}^{-2}$ ;  $\frac{S_{col}}{\rho}$  – гальмівна здатність речовини,  $\text{MeV} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ .

Проведемо розрахунок ослаблення пучка прискорених електронів при проходженні через повітряний прошарок між джерелом електронів (прискорювачем) і об'єктом, що опромінюється. Нехай прискорювач електронів випромінює монохроматичне пучок прискорених електронів. Число взаємодій (розсіювання і поглинання) в нескінченно тонкому шарі речовини поглинача  $dx$  пропорційне концентрації атомів в речовині поглинача  $n$ , інтенсивності падаючого пучка  $N$ :

$$-dN = \mu' N dx, \quad (2)$$

де  $\mu'$  – лінійний коефіцієнт ослаблення,  $\text{см}^{-1}$ .

Після інтегрування виразу (2) отримуємо закон ослаблення прискорених електронів в речовині поглинача (повітря):

$$N = N_0 e^{-\mu' x}, \quad (3)$$

де  $x$  – товщина поглинача,  $\text{см}$ .

Лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu'$  залежить від максимальної енергії випромінювання  $E_{\max}$  і властивостей речовини – поглинача. При визначенні енергії  $\beta$ -частинок в першому наближенні  $\mu'$  залежить від числа електронів  $n_e$  в одиниці об'єму речовини – поглинача. Останню величину,  $n_e$ , легко визначити за допомогою параметрів  $Z$  і  $A$ , числа Авогадро  $N_A$  і щільності речовини  $\rho$ , використовуючи співвідношення:

$$n_e = N_A \rho \frac{Z}{A}. \quad (4)$$

Вважаючи лінійний коефіцієнт ослаблення  $\mu'$  пропорційним числу електронів  $n_e$ .

$$\mu' = K \cdot n_e, \quad (5)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, отримуємо співвідношення:

$$\mu' = K N_A \rho \frac{Z}{A}. \quad (6)$$

Оскільки відношення  $Z/A$  для різних речовин – поглиначів змінюються в досить вузьких межах (0,5 – 0,4), практичніше користуватися замість лінійного коефіцієнта ослаблення  $\mu'$  масовим коефіцієнтом ослаблення:  $\mu = \mu'/\rho$  ( $\text{см}^2/\text{г}$ ), який може бути знайдений в [16]. Таким чином ми можемо знайти  $\mu'$  для даної речовини з табличних даних.

Так як опромінення матеріалу спеціального робочого одягу в наших умовах проводиться на

конвеєрі, то нам треба врахувати швидкість конвеєра, тобто необхідно враховувати час опромінення. Розглянемо зміни, які відбуваються за проміжок часу  $t$ . Так як, за визначенням флюенс дорівнює числу частинок, які перетинають поверхню площею  $S$ :

$$\Phi = \frac{N}{S}, \quad (7)$$

то за час  $t$  конвеєр пройде шлях, що дорівнює добутку швидкості конвеєра на час  $t$ , а площа  $S$  буде дорівнює добутку пройденого шляху на довжину обробленої ділянки об'єкта (довжина ящика, наповненого матеріалом спеціального робочого одягу) 1:

$$S = v \cdot t \cdot l. \quad (8)$$

І кінцева формула поглинутої дози рухомого об'єкта, що опромінюється приймає наступний вигляд:

$$D_e = 1,6 \cdot 10^{-13} N_0 \frac{e^{-\mu'x}}{v \cdot t \cdot l} \cdot \frac{S_{col}}{\rho}. \quad (9)$$

Відповідно до даних наведеними в [17], в НДК "Прискорювач" ННЦ ХФТІ випускне вікно має розміри 2x30 см. Для оцінки діаметр пучка приймемо рівним 1 см. Частота проходження імпульсів пучка - 12,5 - 300 Гц (для розрахунків цю величину приймемо рівній 100 Гц), частота сканування пучка - 3 Гц. Потужність пучка - 10 кВт, енергія - 10 МеВ. Струм пучка складе - 1 мА, що відповідає  $N_0 = 6,24 \cdot 10^{15}$  електронів в імпульсі. Ширина верхнього спеціального одягу (в середньому) дорівнює 50 см, довжина - 70 см. Відстань між випускним вікном і об'єктом, що опромінюється - близько 1 м.

Також, будемо вважати, що матеріал спеціального одягу - целюлоза, так як бавовна складається з целюлози на 99,5%, її хімічна формула  $[C_6H_{10}O_5]_n$  і щільність  $1,5 \text{ г/см}^3$ . Гальмівна здатність целюлози представлена на рис. 1.

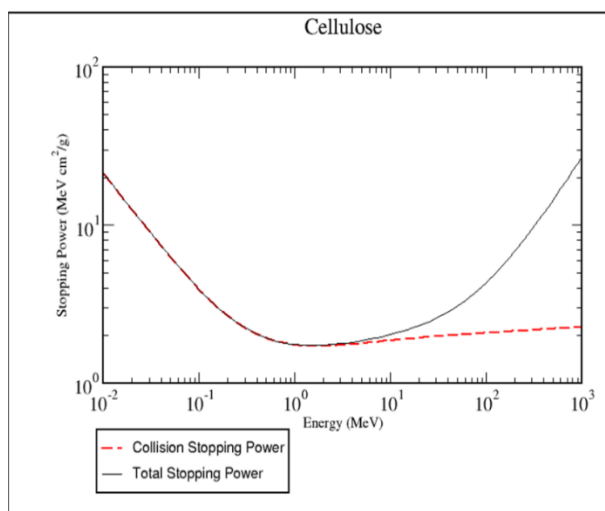


Рис. 1. Гальмівна здатність целюлози в залежності від енергії пучка електронів

Так як щільність повітря вкрай мала в порівнянні з опромінюваним об'єктом і становить  $0,00129 \text{ г/см}^3$ , і

на підставі рис. 2 для шару повітря в 1 м величина в розмірності осі ординат дорівнюватиме  $0,129 \text{ г/см}^2$  величину  $e^{-\mu'x}$  у формулі (9) приймемо рівної 0,9. І для заданої енергії 10 МеВ гальмівна здатність целюлози дорівнює  $1,859 \text{ МеВ см}^2/\text{г}$ .

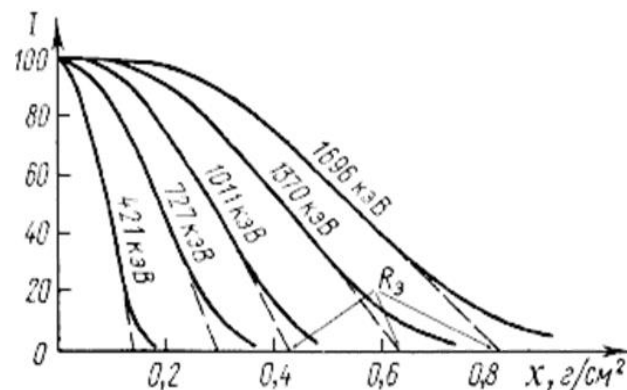


Рис. 2. Ослаблення інтенсивності пучка електронів в залежності від товщини повітря

Беручи до уваги перераховані вище параметри розрахуємо порядок обчислення параметрів, що залишилися у формулі (9), а саме  $v \cdot t \cdot l$ . За одну секунду пучок сканується три рази при цьому випускається 100 імпульсів пучків електронів і за цей час конвеєр проходить  $v$  сантиметрів. Площа пучка становить  $0,7854 \text{ см}^2$ . За 1 секунду загальна довжина опроміненого виробу складе 300 см. Приймемо швидкість конвеєра дорівнює  $1 \text{ см/с}$ . За 1 с прискорювач зробить 100 імпульсів електронів і беручи до уваги, що діаметр пучка - 1 см і ширина поверхні, що обробляється - 50 см, то на кожен сантиметр доведеться по 2 імпульси, таким чином  $N_0$  у формулі (9) подвоюється. Узагальнюючи вищенаведені викладки формула (9) набуває такого вигляду з урахуванням частоти проходження імпульсів пучка, швидкості конвеєра і довжини об'єкта, який обробляється (крайовими ефектами нехтуємо і припускаємо, що обробляється об'єкт не довше ширини конвеєра):

$$D_e = 1,6 \cdot 10^{-13} \eta \cdot N_0 \frac{v \cdot d}{v \cdot l} \cdot \frac{S_{col}}{\rho}, \quad (10)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт ослаблення при проходженні пучка прискорених електронів;  $N_0$  - кількість електронів в імпульсі;  $v$  - частота проходження імпульсів пучка, Гц;  $d$  - діаметр пучка, см;  $v$  - швидкість конвеєра, см/с;  $l$  - ширина об'єкта, що обробляється, см;  $\frac{S_{col}}{\rho}$  - гальмівна здатність речовини,  $\text{МеВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ .

Використовуючи математичну модель можна розрахувати нормативні режими процесу дезінфекції спеціального одягу у вигляді частоти проходження імпульсів пучка та швидкості конвеєра. В якості прикладу приведено нормативні режими дезінфекції спеціального одягу у вигляді частоти проходження імпульсів пучка та швидкості конвеєра 0,5, 1 та 2 см/с для швейної вати на рис. 3.

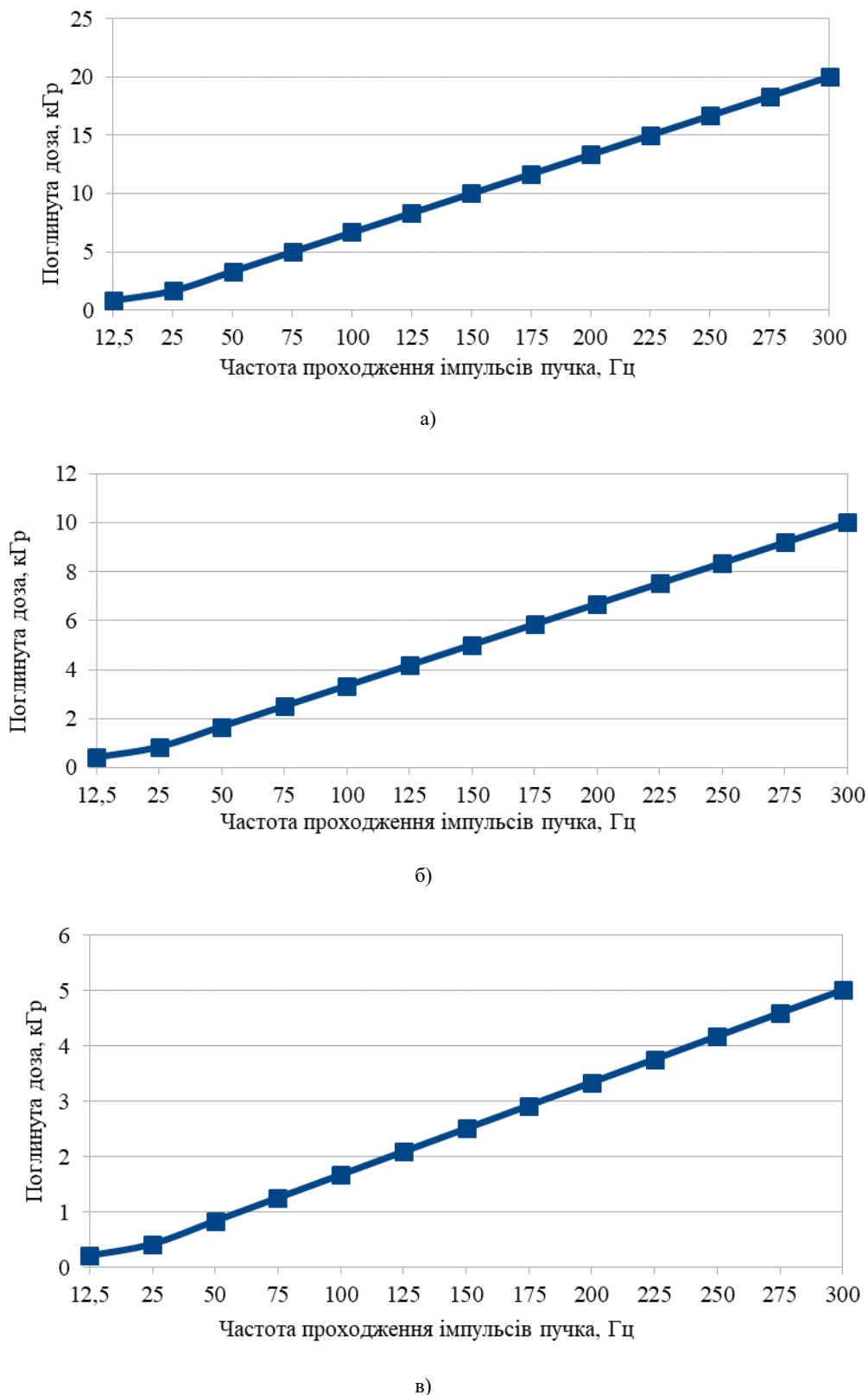


Рис. 3. Залежність поглинутої дози спеціальним одягом в залежності від частоти проходження імпульсів пучка для швидкості конвеєра: а) - 0,5 см/с; б) - 1 см/с; в) – 2 см/с

### Висновки

Запропоновано удосконалену математичну модель поглинутої дози спеціальним одягом в залежності від частоти проходження імпульсів пучка

прискорених електронів швидкості конвеєра і геометричних параметрів об'єкта, для розрахунку технологічних режимів процесу радіаційної стерилізації. Удосконалена математична модель поглинутої дози спеціальним одягом дає можливість



розрахувати режими опромінення різних матеріалів спеціального одягу, які відрізняються розміром, формою і фізичними властивостями, що дозволить розробити систему нормативних режимів технології радіаційно-фізичної дезінфекції робочого одягу та забезпечити законодавчі та нормативні вимоги гігієни праці. Відхилення показників розрахованої поглинутої дози з експериментально вимірююю не перевищує 7%.

### Список літератури

1. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 р. №2695-XII. Законодавство України: веб сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 29.05.2020).
2. Про затвердження Мінімальних вимог безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці. Законодавство України: веб сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1494-18> (дата звернення: 29.05.2020).
3. Технічний регламент засобів індивідуального захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 27.08.2008 р. № 761: веб сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2008-%D0%BF> (дата звернення: 29.05.2020).
4. Про затвердження Переліку національних стандартів, добровільне застосування яких може сприйматися як доказ відповідності засобів захисту вимогам Технічного регламенту засобів індивідуального захисту. Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 10 грудня 2013 року № 1462: веб сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va462731-13> (дата звернення: 29.05.2020).
5. Третьякова Л. Д., Остапенко Н. В. Оцінювання ризику у використанні захисного одягу. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 57–66.
6. Ромась М. Д., Цибульська О. В. Щодо визначення потреби в засобах індивідуального захисту для працівників на виробництві. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2015. № 29. С. 88–102.
7. Fernández L., Gutiérrez D., Martínez B., Rodríguez A. Effective Methods for Disinfection and Sterilization. *Antibiotic Drug Resistance*. 2019. P. 567–587. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119282549.ch22>
8. Gutarowska B., Pietrzak K., Machnowski W., Milczarek J. M. Historical textiles – a review of microbial deterioration analysis and disinfection methods. *Textile Research Journal*. 2016. № 87 (19). P. 2388–2406. DOI: 10.1177/0040517516669076
9. Ehlermann D. A. E. The early history of food irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2016. № 129, P. 10–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.024>
10. Chmielewski A. G., Al-Sheikhly M., Berejka A. J., Cleland M. R. Recent developments in the application of electron accelerators for polymer processing. *Radiation Physics and Chemistry*. 2014. № 94, P. 147–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.06.024>
11. Грицан Л. Д., Помацалюк Р. И., Уваров В. Л. Стерилизация лекарственных средств на ускорителе электронов ЛУ-10 НИЦ ХФТИ. *Вопросы атомной науки и техники*. 2017. № 6 (112). С. 157–161.
12. Черняк О. М. Метод обробки радіаційними технологіями спеціального одягу для забезпечення гігієни праці. *Вісник НТУ "ХПІ", Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2018. № 16 (1292). С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.16.12>
13. Черняев А. П., Варзарь С. М. Ускорители в современном мире. *Ядерная физика*. 2014. Т. 77. № 10. С. 1266–1278.
14. Довбня А. Н., Мазилев А. В. Ускоритель электронов: дозиметрия и радиационные риски: монография. Харьков, 2014. 380 с.
15. Титов Д. В., Ноздрачева Е. Л., Шевченко В. А. Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Електроенергетика та перетворювальна техніка. Прилади та методи контролю та визначення складу речовин*. 2014. № 19. С. 58–64.
16. Berger M. J., Coursey J., Zucker M., Chang J. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions: NIST Standard Reference Database 124: веб сайт. URL: <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions> (дата звернення: 29.05.2020).
17. Борискин В. Н., Ванжа С. А., Верещака В. Н. Развитие радиационных технологий и испытаний в НИК "Ускоритель" НИЦ ХФТИ. *Вопросы атомной науки и техники*. 2008. № 5. С. 150–154.

### References

1. On labor protection: Law of Ukraine of 14.10.1992. No 2695-XII, ["Pro okhoronu praci: Zakon Ukrajinjy vid 14.10.1992. No 2695-XII"], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (last accessed: 29.05.2020).
2. "On approving the minimum safety and health workers using personal protective equipment at the workplace", ["Pro zatverdzhennja minimal'nykh vymogh bezpeky i okhorony zdorov'ja pry vykorystanni pracivnykamy zasobiv indyvidual'nogho zakhystu na robochomu misi"], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1494-18> (last accessed: 29.05.2020).
3. "Technical regulations personal protective equipment: Cabinet of Ministers of Ukraine of 27.08.2008 No 761", ["Tekhnichnyj rehhlament zasobiv indyvidual'nogho zakhystu: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrajinjy vid 27.08.2008 No 761"], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2008-%D0%BF> (last accessed: 29.05.2020).
4. "On approving the list of national standards voluntary application of which can be seen as proof of means of protection requirements of the Technical Regulations PPE. Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine dated December 10, 2013 No 1462", ["Pro zatverdzhennja Pereliku nacional'nykh standartiv, dobrovil'jne zastosuvannja jakykh mozhe spryjmatysja jak dokaz vidpovidnosti zasobiv zakhystu vymogham Tekhnichnogho rehhlamentu zasobiv indyvidual'nogho zakhystu. Nakaz Ministerstva ekonomichnogho rozvytku i torghivli Ukrajinjy vid 10 ghurdnja 2013 roku No 1462"], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va462731-13> (last accessed: 29.05.2020).
5. Tretyakova L. D., Ostapenko, N. V. (2016) "Risk assessment in the use of protective clothing", ["Ocinjuvannja ryzyku u vykorystanni zakhysnogho odjaghu"], *Labor protection problems in Ukraine*, No. 32, P. 57–66.

6. Romas, M. D., Tsibulska, O. V. (2015), "Regarding the determination of the need for personal protective equipment for workers in the workplace", ["Shhodo vyznachennja potreby v zasobakh individualnogo zakhystu dlja pracivnykiv na vyrobnyctvi"], *Labor protection problems in Ukraine*, No. 29, P. 88–102.
7. Fernández, L., Gutiérrez, D., Martínez, B., Rodríguez, A. (2019), "Effective Methods for Disinfection and Sterilization", *Antibiotic Drug Resistance*, P. 567–587. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119282549.ch22>
8. Gutarowska, B., Pietrzak, K., Machnowski, W., & Milczarek, J. M. (2016), "Historical textiles – a review of microbial deterioration analysis and disinfection methods", *Textile Research Journal*, No. 87 (19), P. 2388–2406. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517516669076>
9. Ehlermann, D. A. E. (2016), "The early history of food irradiation", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 129, P. 10–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.024>
10. Chmielewski, A. G., Al-Sheikhly, M., Berejka, A. J., Cleland, M. R. (2014), "Recent developments in the application of electron accelerators for polymer processing", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 94, P. 147–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.06.024>
11. Gritsan, L. D., Pomatsalyuk, R. I., Uvarov, V. L. (2017), "Sterilization of pharmaceuticals at a LU-10 electron accelerator of NSC KIPT", ["Sterilizatsiya lekarstvennykh sredstv na uskoritele elektronov LU-10 NNTs KhFTI"], *Problems of atomic science and technology*, No. 6 (112), P. 157–161.
12. Cherniak, O. (2018), "The method of processing the special clothes of radiation technology to provide occupational health" ["Metod obrobky radiacijnykh tekhnologijamy specialnogo odjaghu dlja zabezpechennja ghghijeny praci"], *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, No. 16 (1292), P. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.16.12>
13. Chernyayev, A. P., Varzar, S. M. (2014), "Accelerators in the modern world" ["Uskoriteli v sovremennom mire"], *Nuclear physics*, Vol. 77. No. 10, P. 1266–1278.
14. Dovbnya, A. N., Mazilov, A. V. (2014), Electron accelerator: dosimetry and radiation risks: monograph, [Uskoritel' elektronov: dozimetriya i radiatsionnye riski: monografiya], Mis'kdruk, Kharkov, 380 p.
15. Titov, D. V., Nozdracheva, E. L., Shevchenko, V. A. (2014), "Method for measurement of absorbed dose in the processing of products on the linear electron accelerator", ["Metod izmerenija pogloshhennoj dozy pri obrabotke produkci na linejnom uskoritele jelektronov"], *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electricity and converting equipment. Instruments and methods for monitoring and determining the composition of substances*, No. 19, P. 58–64.
16. Berger M. J., Coursey J., Zucker M., Chang J. "Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions: NIST Standard Reference Database 124", available at: <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions> (last accessed: 29.05.2020).
17. Boriskin, V. N., Vanzha, S. A., Vereshhaka, V. N. (2008), "Development of radiation technologies and tests at SRC "Accelerator" NSC KIPT", ["Razvitie radiatsionnykh tekhnologiy i ispytaniy v NIK "Uskoritel" NNTs KhFTI"], *Problems of atomic science and technology*, No. 5, P. 150–154.

Надійшла (Received) 12.05.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Черняк Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, асистент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [olena-cherniak@ukr.net](mailto:olena-cherniak@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6167-8809>.

**Черняк Елена Николаевна** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, ассистент кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации, Харьков, Украина.

**Cherniak Olena** – PhD (Engineering Sciences), Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Assistant of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

**Бурдейна Вікторія Михайлівна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [zamorskavika@ukr.net](mailto:zamorskavika@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0026-1900>.

**Бурдейная Виктория Михайловна** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации, Харьков, Украина.

**Burdeina Viktoriia** – PhD (Engineering Sciences), Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Docent of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

**Артюх Світлана Миколаївна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [artyhsn@gmail.com](mailto:artyhsn@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-6313>.

**Артюх Светлана Николаевна** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации, Харьков, Украина.

**Artiukh Svitlana** – PhD (Engineering Sciences), Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Docent of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ, ОБЛУЧАЕМОЙ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

**Предметом** исследования в статье является математическая модель поглощенной дозы специальной одежды. Цель работы - усовершенствовать математическую модель поглощенной дозы специальной одежды, облучаемой ускоренными электронами. В статье решаются следующие **задачи**: исследовать возможность применения усовершенствованной математической модели поглощенной дозы специальной одежды в зависимости от частоты прохождения импульсов пучка ускоренных электронов, скорости конвейера и геометрических параметров объекта, для расчета технологических режимов процесса радиационной стерилизации. Используются следующие **методы**: математической физики. Получены следующие **результаты**: отмечено о важности ухода за специальной одеждой рабочих; определены недостатки современных методов дезинфекции и обоснована необходимость дезинфекции специальной одежды ускоренными электронами с помощью специальных ускорителей электронов; установлено, что основным критерием радиационной дезинфекции является поглощенная доза и обоснована необходимость определения максимально допустимого значения дозы с помощью математической модели. Усовершенствованная математическая модель поглощенной дозы специальной одежды даст возможность рассчитать режимы облучения различных материалов специальной одежды, которые отличаются размером, формой и физическими свойствами, что позволит разработать систему нормативных режимов технологии радиационно-физической дезинфекции рабочей одежды и обеспечить законодательные и нормативные требования гигиены труда. Рассчитано нормативные режимы процесса дезинфекции специальной одежды в виде зависимости поглощенной дозы в зависимости от частоты следования импульсов пучка и скорости конвейера. **Выводы**: усовершенствована математическая модель поглощенной дозы специальной одежды в зависимости от частоты прохождения импульсов пучка ускоренных электронов, скорости конвейера и геометрических параметров объекта, и применены для расчета нормативных технологических режимов процесса дезинфекции специальной одежды.

**Ключевые слова**: математическая модель; поглощенная доза; ускоренные электроны; специальная одежда; дезинфекция.

## IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DOSE ABSORBED BY SPECIAL CLOTHING IRRADIATED WITH ACCELERATED ELECTRONS

The **subject** of the research in the article is a mathematical model of the dose absorbed by special clothing. The **goal** of the work is to improve the mathematical model of the dose absorbed by special clothing irradiated with accelerated electrons. The following **tasks** are solved in the article: to investigate the possibility of using the improved mathematical model of the dose absorbed by special clothing depending on the frequency of the beam pulses of accelerated electrons, conveyor speed and geometrical parameters of the object, to calculate the technological modes radiation sterilization process. The following **methods** are used – mathematical physics. The following **results** have been obtained: the importance of caring for workers' special clothing was noted; the shortcomings of modern disinfection methods were identified and the need for disinfection of special clothing with accelerated electrons using special electron accelerators was justified; it has been established that the main criterion for radiation disinfection is the absorbed dose; the necessity of determining the maximum allowable dose using the mathematical model was justified. An improved mathematical model of the dose absorbed by special clothing makes it possible to calculate the irradiation modes of various materials of special clothing that differ in size, shape and physical properties, which will allow us to develop a system of regulatory regimes for radiation-physical disinfection of work clothes and ensure legislative and regulatory requirements for occupational health. The normative regimes of the process of special clothes disinfection are calculated in the form of the dependence of the absorbed dose depending on the pulse repetition rate and the conveyor speed. **Conclusions**: the mathematical model of the dose absorbed by special clothing was improved depending on the frequency of the pulses of the accelerated electron beam, the conveyor speed and the geometric parameters of the object. It was used to calculate the regulatory technological modes of the process of disinfection of special clothes.

**Keywords**: mathematical model; absorbed dose; accelerated electrons; special clothing; disinfection.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Черняк О. М., Бурдейна В. М., Артюх С. М. Удосконалення математичної моделі поглинутої дози спеціальним одягом, що опромінюється прискореними електронами. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 2 (12). С. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.075>.

Cherniak, O., Burdeina, V., Artiukh, S. (2020), "Improvement of the mathematical model of the dose absorbed by special clothing irradiated with accelerated electrons", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.075>.